

Z BOZONOK JELENTŐSÉGE NEHÉZION-ÜTKÖZÉSEKBEN

Zsigmond Anna Julia

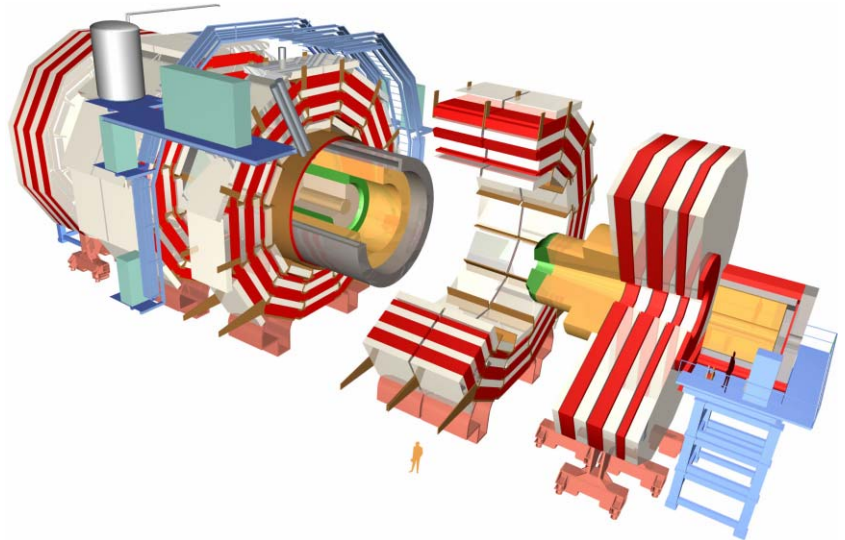
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
Max Planck Institut für Physik, München

Nagyenergiás nehézion-ütközésekben a Világegyetem korai időszakában létező sűrű és forró anyagot, a kvark-gluon plazmát tanulmányozzuk. A kvarkok az erős kölcsönhatásban résztvevő anyagi részecskék, amelyeket a gluonok, az erős kölcsönhatás közvetítő részecskéi tartanak össze. A kvarkok és gluonok, együttes nevükön partonok, a hadronok építőkövei. Ilyen hadronok például a proton és a neutron, amelyek az atommagokat, és így a hétköznapi anyag nagy részét alkotják.

Elsőként a Brookhaven National Laboratory kísérletei figyelték meg a kvark-gluon plazmát arany atommagok 200 GeV nukleonpáronkénti tömegközépponti energiájú ütközéseiben. A várakozásokkal ellentétben azt találták, hogy egy erősen kölcsönható közeg jön létre, amely majdnem tökéletes folyadékként viselkedik [1–4].

Az atommag-atommag ütközések fontos tulajdonsága a kezdeti geometria, vagyis a két atommag átfedésének mértéke, amit centralitásnak is hívunk. A részecskekeletkezés az események centralitásától függ. A keletkezett kis impulzusú részecskék száma jó közelítéssel arányos az ütközésben résztvevő nukleonok számával. A nagy impulzusátadással járó kemény folyamatok, mint például a fotonok vagy gyenge bozonok és a nagyenergiájú hadronzárporok, más néven jetek keletkezése, ugyanakkor az elemi nukleon-nukleon ütközések számával skáláznak.

Az LHC (Nagy Hadronütköztető) révén elért ütközési energiák első alkalommal nyitották meg a lehetőségét a nagy tömegű, gyenge bozonok keletkezésének és vizsgálatának nehézion-ütközésekben. A Z és



1. ábra. A CMS kísérlet sematikus rajza.

W bozonok mérése fontos viszonyítási alap, mivel ezek az ütközés elején, a kvark-gluon plazma kialakulása előtt keletkeznek és el is bomlanak, ennél fogva keletkezésük csak az ütközés kezdeti geometriájától függ, és azt a forró és sűrű közeg nem módosítja. A Z bozon bomlása elektron- vagy müonpárokra különös érdeklődésre tart számot, mert a leptonok nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban, így gyakorlatilag szabadon keresztüljutnak a közegen. Ez lehetőséget ad arra, hogy nehézion-ütközésekben ellenőrizzük a kemény folyamatok skálázási tulajdonságait, és hogy a Z bozonokat referenciaként használjuk módosult folyamatok, mint például nagy energiájú partonok és hadronzárporok elnyomásának tanulmányozásakor.

Az LHC nehézion-fizikai programja 2010. év végén kezdődött ólom atommagok 2,76 TeV nukleonpáronkénti, tömegközépponti energiájú ütközéseivel, majd 2011. év végén nagyobb adatmennyiség felvételére került sor. A kialakult kvark-gluon plazmának köszönhető hatások leválasztásához a méréseket proton-proton ütközések eredményeivel hasonlítjuk össze. Ehhez az LHC 2011-ben és 2013-ban szolgáltatott azonos 2,76 TeV-os tömegközépponti energiával proton-proton ütközéseket.

Jelen írásunkban a CMS kísérlet nehézion-fizikai csoportjának eredményeiről számolunk be. Az 1. ábrán a CMS kísérlet [5] sematikus vázlatát látható. Bevezetésként a Z bozonok és jetek témaköréből mutatunk be eredményeket, majd a legújabb mérésre, a Z bozonok és jetek korrelációjának vizsgálatára térünk át. Z bozon-jet párok keletkezésének megfigyelését és mérését a 2015-ben elért nagyobb ütközési energia (nukleonpáronként 5,02 TeV) és nagyobb adatmeny-

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.

A munkát az OTKA (NK 81447, K 81614, K 109703) és Swiss National Science Foundation (152601) pályázatok támogatták.



Zsigmond Anna a müncheni Max Planck Institut für Physik posztdoktori kutatója, ahol a GERDA kísérlet tagjaként a neutrínó nélküli kettős béta-bomlás keresésében vesz részt. 2016-ig a Wigner Fizikai Kutatóközpont fiatal kutatójaként a CMS kísérletben végzett kutatásokat nehézion-ütközések témájában. PhD dolgozatát az ELTE-n védte meg *Z bozonok keletkezésének tanulmányozása nehézion-ütközésekben a CMS kísérletben* címmel.

nyiség tette lehetővé. Az eredményeket az ugyancsak 2015-ben felvett referencia proton-proton ütközésekkel hasonlítjuk össze.

Z bozonok vizsgálata

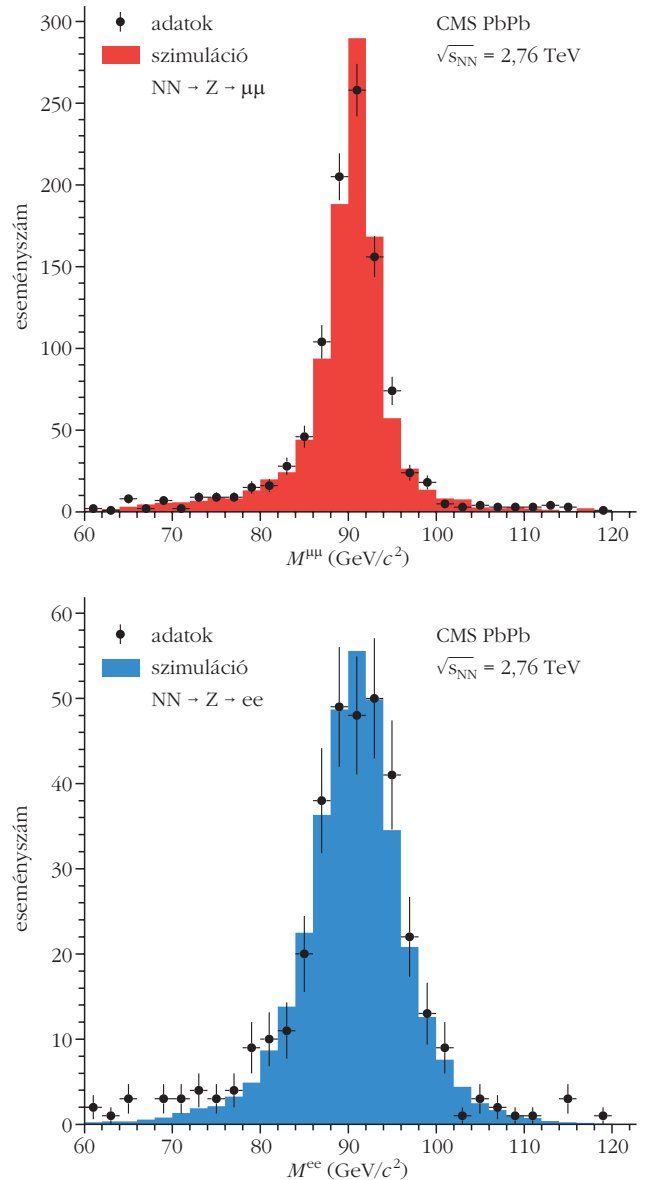
A Z bozonokat ellentétes töltésű leptonpárokra való bomlásaik alapján azonosítjuk. A CMS kísérlet kitűnő pontossággal képes nagy energiájú müonokat és elektronokat azonosítani, és azok transzverzális (nyalábirányra merőleges) impulzusát (p_T) meghatározni. A müonokat a belső nyomkövetőben és a külső müondetektorokban megfigyelt nyomok kombinált illesztése alapján rekonstruáljuk. Az elektronokat egy, az elektromágneses kaloriméterben keletkezett zápor alapján azonosítjuk, és a fékezési sugárzást figyelembe vevő, kívülről befelé haladó nyomkövetéssel választjuk külön a fotonoktól.

A keletkezett Z bozonok számát a 60–120 GeV/c² invariáns (nyugalmi) tömegtartományban talált leptonpárok száma alapján határozzuk meg proton-proton és ólom-ólom ütközésekben egyaránt. A 2. ábrán a Z bozon csúcs látható a müonos és az elektronos bomlási csatornában, összehasonlítva a szimulációkkal. Az adatok és a szimuláció jó egyezést mutatnak, ami demonstrálja, hogy e folyamat háttere nehézion-ütközésekben is alacsony. A talált, ellentétes töltésű müon-, illetve elektronpárok számát a szimulációból meghatározott hatásfokokkal korrigálva meghatározható a Z bozonok keletkezési hozama.

A Z bozonok hozamát az események centralitásának függvényében vizsgálva azt találjuk, hogy az adott centralitásosztályban a hozam arányos az elemi nukleon-nukleon ütközések átlagos számával. Ez az eredmény megerősíti a kemény folyamatok skálázási tulajdonságaival kapcsolatos várakozásainkat. Az ólom-ólom ütközésekben mért, és az elemi nukleon-nukleon ütközések átlagos számával elosztott hozamot a referencia proton-proton ütközésekben mért hatáskeresztmetszettel elosztva kapjuk a nukleáris módosulási faktort, amely nem-módosuló folyamatokra egy, elnyomás esetén pedig egynél kisebb értéket vesz fel. A Z bozonok nukleáris módosulási faktora a mérési bizonytalanságokon belül egynek adódik centralitás, transzverzális impulzus és rapiditás függvényében is. Ezen mérésekkel beláttuk, hogy a Z bozonokat nem befolyásolja az erősen kölcsönható közege, illetve hogy a lehetséges kezdeti állapotú effektusok a mérési bizonytalanságokon belül vannak [6].

Jetelnyomás tanulmányozása

Két nagyenergiás részecske ütközésekor gyakori folyamat, hogy egymással ellentétes irányban egy nagy transzverzális impulzusú partonpár keletkezik. Az erős kölcsönhatás kvarkbezárési tulajdonságának köszönhetően ezek a partonok nem jutnak el a detektorig, hanem kvark-antikvark párok keletkezésével

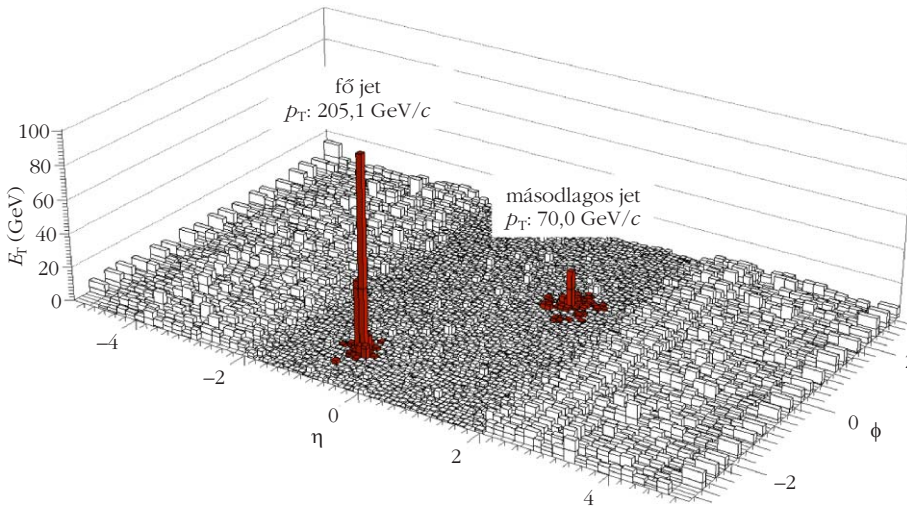


2. ábra. A kiválasztott müonpárok (felül) és elektronpárok (alul) invariánstömeg-eloszlása ólom-ólom ütközésekben.

egy-egy hadronzáport hoznak létre, amit jetnek hívunk. A jeteket az elektromágneses és a hadronikus kaloriméterek együttes információja alapján rekonstruáljuk egy adott méretű kúpban.

Nagyenergiás nehézion-ütközésekben a kemény folyamatban keletkezett jetek kölcsönhatnak a kvark-gluon közzeggel, amitől elveszítik energiájuk egy részét. Ezt a folyamatot hívjuk a jetek elnyomásának. A jetelnyomás vizsgálata hozzájárul a kvark-gluon plazma tulajdonságainak jobb megértéséhez. Az LHC-nál elért energiák lehetővé tették, hogy közvetlenül megfigyeljünk olyan eseményeket, amelyekben egy nagyenergiás jetet rekonstruálunk, de az ellentétes irányban csak kis impulzussal, vagy egyáltalán nem találunk jetet. Egy ilyen eseményre mutat példát a 3. ábra.

A jetpárokkal végzett mérések a CMS kísérletben azt találták, hogy centrális események felé haladva egyre aszimmetrikusabbak az események, vagyis ahogy a

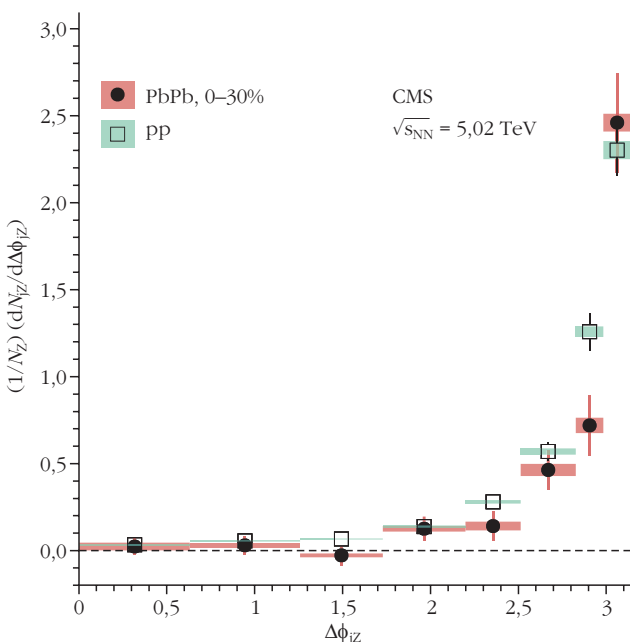


3. ábra. Egy ólom-ólom ütközés aszimmetrikus jettárral.

kvar-kluon plazma térfogata nő, úgy egyre több jet veszíti el energiájának egy részét [7, 8]. Az energiamegmaradás ezekben az ütközésekben sem sérül, mert a jet által a közegben leadott energiát, a jet irányához képest nagy szögben szóródott kis impulzusú részecskék hordozzák. Azt is megmutatták, hogy a nehéz b kvarkot tartalmazó jetek a könnyű jetekhez hasonló mértékben veszítik el energiájukat ólom-ólom ütközésekben [9], vagyis a partonok fajtájától (ízétől) nem függ jelentősen a kvar-kluon plazma hatása.

A jettárral végzett mérések csak a relatív energiavesztésről adnak információt, hiszen mindkét jet kölcsönhat a közeggel mielőtt detektáljuk őket. Ezzel szemben foton-jet párok mérésével az abszolút energiavesztésről is képet kaphatunk, hiszen a foton erős kölcsönhatás nélkül jut el az elektromágneses kaloriméterbe. A foton megadja a jet kezdeti irányát

4. ábra. A Z bozon és jet által bezárt azimutális szög eloszlása proton-proton és ólom-ólom ütközésekben.



és energiáját, valamint azonosítja az eredetét, ugyanis a legvalószínűbb folyamatban a fotonnal együtt u vagy d kvark keletkezik.

A CMS kísérlet foton-jet párok vizsgálatával és proton-proton ütközésekkel való összehasonlításukkal megmutatta, hogy a jet iránya a közegben nem változik, de centrális eseményekben a jetek átlagosan energiájuk 15%-át veszítik el [10]. A foton-jet események vizsgálatánál nehézséget okoz az ütközés során keletkező rengeteg foton közül a jettel együttesen keletkező elsődleges fotonok

kiválogatása. Erre a nehézségre adnak megoldást a Z bozonok, mert ahogy megmutattuk, ezek azonosítása rendkívül kis háttérrel megvalósítható.

Z bozonok és jetek korrelációjának vizsgálata

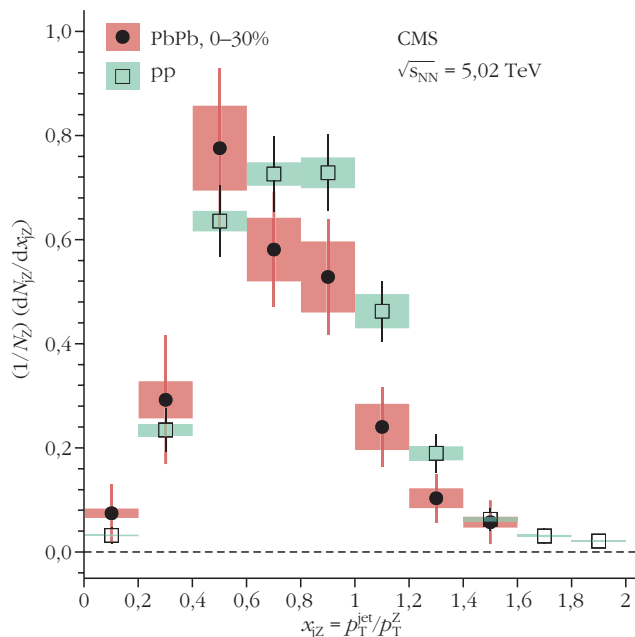
A Z bozon a fotonhoz hasonlóan megadja a parton kezdeti energiáját, és legvalószínűbb esetben a könnyű u és d kvarkokkal keletkezik együtt, így ezek energiavesztéséről nyerhetünk kvantitatív információt. A CMS kísérletben a 2015-ben felvett nagy statisztikájú, 5,02 TeV tömegközépponti energiájú ütközésekben Z bozonok segítségével vizsgáltuk a jetnyomást [11].

Az ólom-ólom ütközések közül nagy transzverzális impulzusú Z bozonokat válogattunk ki a müonos és az elektronos bomlási csatornában, és összepárosítottuk őket az eseményben rekonstruált jettekkel. A mérésekhez centrális ólom-ólom ütközéseket használtunk, amelyek a teljes hadronikus hatáskeresztmetszet, vagyis az összes hadron kölcsönhatásával járó esemény 30%-ának felelnek meg.

A 4. ábrán a Z bozon és a jetek által bezárt azimutális (nyalábirányra merőleges síkban mért) $\Delta\phi_{jZ}$ szög eloszlása látható proton-proton és ólom-ólom ütközésekben. Azt figyelhetjük meg, hogy mindkét ütközési rendszerben a jeket a Z bozonnal ellentétes irányban detektáljuk, tehát a kvar-kluon plazma nem változtatja meg jelentősen a jet irányát.

Az energiavesztés méréséhez a jetek és a Z bozonok transzverzális impulzusának arányát (x_{jZ}) számoltuk ki, és proton-proton ütközésekkel összehasonlítva ábrázoltuk az arány eloszlását az 5. ábrán. Ólom-ólom ütközésekben x_{jZ} átlagosan alacsonyabb, mint proton-proton ütközésekben a parton közegbeli energiavesztésének köszönhetően. A mért eloszlások segítségével pontosíthatjuk a jetnyomás leírását modelleinkben és a szimulációkat.

Az eddigi eredményekhez a Z bozonnal ellentétes irányban rekonstruált jeket használtuk, azonban az

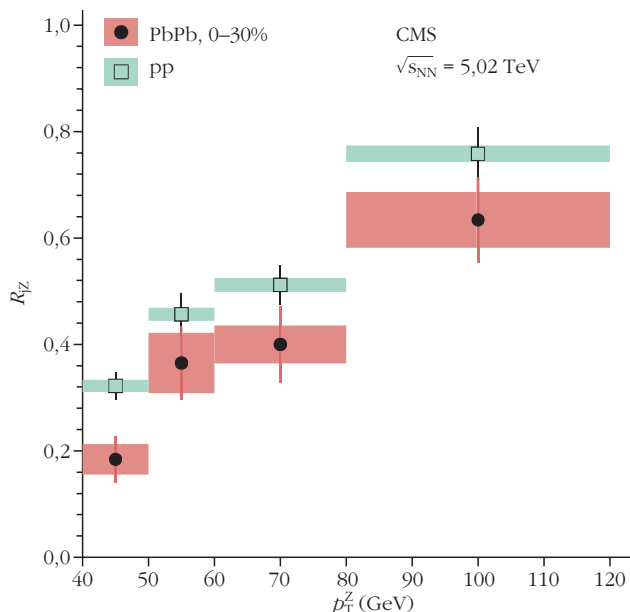


5. ábra. A jet és a Z bozon transzverzális impulzusának aránya proton-proton és ólom-ólom ütközésekben.

energiavesztésnek köszönhetően előfordulhat, hogy a kilépő hadronzár energiája nem elég, hogy jetként rekonstruáljuk. A 6. ábrán a Z bozon transzverzális impulzusának függvényében látható a Z bozonnal ellentétes irányban talált jetek átlagos száma (R_{jZ}) a két ütközési rendszerben. A Z bozon transzverzális impulzusától függetlenül kevesebb jeket találunk ólom-ólom ütközésekben, mint proton-proton ütközésekben, és az arányuk a mérési bizonytalanságokon belül állandó.

Összefoglalás

A CMS kísérlet méréseivel beláttuk, hogy a Z bozon hozama az elemi nukleon-nukleon ütközések számával skálázik ólom-ólom ütközésekben, tehát a Z bozonok keletkezését nem befolyásolja az ütközésekben kialakuló erősen kölcsönható, sűrű és forró közeg. Ezzel szemben az erős kölcsönhatásban résztvevő partonok szóródnak a kvark-gluon plazmában, ennél fogva a belőlük kialakuló nagyenergiás jetek vizsgálata a közeg transzporttulajdonságairól szolgáltat információt. Korábbi mérésekben megfigyeltük, hogy a centrális ólom-ólom ütközésekben a jetc párok aszimmetrikusak, és a hiányzó energiát a jetcúpon kívüli alacsony impulzusú részecskék hordozzák. A 2015 végén felvett nagyobb tömegközépponti energiájú és nagyobb adatmennyiségű ólom-ólom ütközésekben először vált lehetővé a Z



6. ábra. A Z bozonnal ellentétes irányban talált rekonstruált jetek aránya a Z bozon transzverzális impulzusának függvényében proton-proton és ólom-ólom ütközésekben.

bozonok és jetek korrelációjának vizsgálata. Azt találtuk, hogy a Z bozonnal párban keletkező jetek megtartják az irányukat, de elveszítik energiájuk egy részét. A Z bozonnal együtt keletkező jetek átlagos száma a proton-proton ütközésekben mérhető képest a Z bozon transzverzális impulzusától függetlenül alacsonyabb, vagyis a jetek egy része annyi energiát veszít, hogy jetcúként nem tudjuk rekonstruálni. Az itt bemutatott eredmények pontosítják tudásunkat a kvark-gluon plazma transzporttulajdonságairól, amit a szimulációk fejlesztésére tudunk használni.

Irodalom

1. BRAHMS Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 1, arXiv:nucl-ex/0410020.
2. PHENIX Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 184, arXiv:nucl-ex/0410003.
3. PHOBOS Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 28, arXiv:nucl-ex/0410022.
4. STAR Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 102, arXiv:nucl-ex/0501009.
5. CMS Collaboration, *JINST* 3 (2008) S08004.
6. CMS Collaboration, *JHEP* 03 (2015) 022, arXiv:1410.4825.
7. CMS Collaboration, *Phys. Rev. C* 84 (2011) 024906, arXiv:1102.1957.
8. CMS Collaboration, *Phys. Lett. B* 712 (2012) 176, arXiv:1202.5022.
9. CMS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 132301, arXiv:1312.4198. [Erratum: *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 029903].
10. CMS Collaboration, *Phys. Lett. B* 718 (2013) 773, arXiv:1205.0206.
11. CMS Collaboration, Accepted to publication in *Phys. Rev. Lett.* (2017), arXiv:1702.01060.

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacímje: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtűtár, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszámé 1800.- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588-0540 (online)